

图9 (括弧内表示含0.01mm细泥的百分比)

### 三、高含沙水流在治理黄河中的应用

黄河天然的高含沙水流不是经常发生的,但能利用小浪底峡谷型水库淤沙调沙而产生人为的高含沙水流。调出的高含沙水流用以放淤。腾出清水用以发电、灌溉和冲刷下游河床。利用高含沙水流明渠输

沙,水和沙分别运行。其优点和效益是:节约输沙用的水量200多亿 $m^3$ ,可用以代替南水北调的北调工程;消除黄河下游洪水危害;均匀放淤,改造华北平原;最大限度利用黄河水沙资源。世界闻名难治的黄河将为高含沙水流所控制。但这有待于高含沙水流理论上的论证和探讨。

### 参考文献

- [1] 方宗岱、郭耀华,浆沙形成条件的重新论证(油印资料)。
- [2] 缪凤举、方宗岱,揭底冲刷现象机理探讨(油印资料)。
- [3] 陈文芳,非牛顿流体力学(英文讲稿),第2届全国流体力学学术会议(1979年11月9—16日,无锡)全体会上报告。
- [4] Gust, G., Observations on turbulent-drag reduction in a dilute suspension of clay in sea-water, *JFM*, Part I (May 1976)。

# 流场显示中的全息照相方法 及其灵敏度提高技术\*

中国科学院力学研究所 李华煜 束继祖

## 一、前言

在电子计算机十分发达的今天,流体测量技术仍然是流体力学发展最基本、最活跃的因素;流场显示中的全息照相方法是流体测量技术中较新和发展非常快的方法之一。

全息照相概念于1948年由英国D. Gabor提出,并由很困难的实验所证明。由于技术上的困难,这个课题停顿了十多年,未引起人们的注意。1962年美国E. N. Leith等用通讯理论来处理全息术,提出离轴法全息照相概念,解决了全息术的一个重大技术问题,重新吸引了人们对这个领域的兴趣。1963年Leith等把激光引入全息术,使全息术有了革命性

的推动力,激起迅猛发展的高潮。1964年左右开始发展的全息干涉术,更是全息术迅猛发展的关键。R. J. Powell等(美,1965)的时间平均法(简称TAHI)<sup>[1]</sup>, J. M. Burch(1965)的实时法(SBHI)<sup>[2]</sup>, L. O. Heflinger(1966)等的双曝光法<sup>[3]</sup>(DEHI)先后发表后,全息干涉术趋于成熟。很快地全息术在各个领域中得到了越来越广泛的应用,并且形成一个很有前途的学科。由于其重要性受到公认,D. Gabor在提出这方法23年以后,于1971年获得了诺贝尔物理学奖金。

全息照相应用于流场显示,开始于全息干涉发明之后,早期工作者有Tanner(1966)<sup>[4]</sup>, Philbert等(1968)<sup>[5]</sup>, Smigielski等(1968)<sup>[6]</sup>, Reinheimer等(1970)<sup>[7]</sup>等。全息术现已发展到定量测

\* 1979年12月17日收到。

量阶段,并且做到与电子计算机联合使用,自动处理数据。工业先进国家:如美、苏、德、法、英、日等,已广泛使用。

本文力图阐明流场显示中的全息照相这一领域发展的概貌,并着重在原理上介绍测量灵敏度问题。文中还顺便简介中国科学院力学研究所在这领域中的一些工作。但挂一漏万和错误在所不免,请读者指正。

## 二、流场全息显示的特点

除光学方法不干扰流场及在极短瞬间采集大量空间信息等特点外,全息方法还有下列几个特点:

1. 不需要精密的光学元件 文献[3]提出的时间差分方法,是区别于古典干涉术的一个革命性概念。它指出光路中所有不精密元件的影响都能自动补偿。因此全息系统就不需精度高的元件和费时的调整。这一特点还可以把干涉计量推广到古典光学方法不能应用的那些领域,在流场显示中,就是使在形状不规则、材料不均匀的透明容器或管道中的流动,能够实现干涉计量。例如Witte对激波在T形管道接头处相互作用的研究[8],力学所徐朝仪等对有机玻璃作盖板的射流元件内部流动的研究[9],都是典型的例子。

2. 可以实现光波存储 可以把存储于很短瞬间的光波再现出来,进行仔细研究和处理,于是就可以大大减少实验的次数,从而节省大量劳动和资金。

3. 存在对流场进行三维密度定量计量的可能性

## 三、流场全息显示几个主要方面的发展概况

### 1. 全息记录的位息处理技术

1) 单曝光流场全息记录可以进行多种方法的光学处理 例如一张全息图可以得到阴影图、各种形式的纹影图和干涉图[10],以及用其他光学方法得到的各种类型信息的图象,免去一次次地做实验的麻烦。这些处理方法中,纹影刀口能引起不必要的衍射,增加了噪声。Smigielski[11]等认为,用Wollaston棱镜代替刀口的差分纹影干涉,能够消除上述噪声,得到更好的图象。力学所全息组曾重复过[11]的试验,得到过良好的图象,但是应该指出,单曝光全息图的光学处理,必然受到全息片基(玻璃板)位相的调制,带入相当可观的误差。我们曾用差分干涉仪考察过国产的干板片基,发现多达几个波长的不均匀光

程是极为常见的。因此在没有改变现有的条件时,用这一方法测量流场,会引入极大的误差,甚至不能使用。

2) 背景条纹的调制技术 希望以有限条纹形式进行干涉计量时,就要进行一些附加的处理。双曝光法也可以产生有限条纹,一般是用在第二次曝光时微动一个光学元件的方法。在要求有限条纹方向和间距可以重复时,可用气楔或液楔[6]。有限条纹也可以在全息图记录以后调制出来。例如,由于要克服因风洞振动,使双曝光法两次曝光的光线不能走严格相同路径而引入的误差,国外发展了双板全息干涉法(DPHI)[12],这方法要求精密的调节机构,能消除误差和调制出各式各样的背景条纹。DPHI也会受到干板片基(参考光入射碰到的第一块)相位不均匀的影响,文献[13]认为如果把两块板尽量靠近,就能基本上消除这种误差。夹层全息图法[14]是国外为测量固体变形而发展起来的一种方法,目的是消去物体刚体移动产生的条纹,以及比较各种变形状态间的差异,这种方法也能调制出任意方向和间距的条纹。中国科学技术大学明海等[15]把这种方法引入流场显示中,在风洞测量中得到一些成果,特点是可用低精度的调节,达到产生背景条纹的效果。力学所李华煜、狄建华对夹层全息技术作了解析分析和原理性实验[16],指出调节参数间的定量关系,解释了只需低精度调节的原因;还证明了在一定条件下,得到的物象不会发生畸变。但同时也指出干板片基会引入很大的误差,由于它与DPHI技术有很大的差别,还未找到有效的解决措施。双参考光全息技术[17],也能在全息图录制以后进行条纹调制,在该系统中,对参考光之一进行精密的微调,就可对再现的条纹进行调制。这个方法的优点,就是干板片基的影响将完全消去,和双曝光情况的原理一样,值得加以重视。

3) 富氏光学提供光学位息处理的理论基础 其主要思想是从记录到的信息空间抽取需要的特征信息,扬弃不需要的噪声。它已经和正在取得很大的成效,是我们今后应该注意发展的重要方向。

### 2. 三维密度场的定量测量

1891年提出的马氏干涉仪,已经提供了对流场作定量测量的可能。但由于技术要求较苛刻,一般误差也较大,因而限制了它的推广和发展。全息术出现以后,由于上述缺点被克服,据报道可以达到1%左右的测量精度,因而越来越多地用以定量测量各种流场。

全息术无疑可以用来解决二维和轴对称流场的测量,力学所全息组对风洞中的30°锥体的流场进行过

定量计算, 由于没有消除双曝光间振动引入的误差, 并且对条纹的测量技术还十分原始, 所以与理论曲线比较, 误差约为 7%, 但初步证实了方法的可用性。由于全息图特有的三维特性, 给三维流场定量测量也提供了可能。目前, 一些文献报道了轴对称模型所产生的非对称流场的定量测量, 认为问题已经初步解决<sup>[18]</sup>。早在 1967 年, 就开始有把全息图信息换算为有关物理量的计算方法的报导<sup>[19]</sup>, 以后, 陆续有基于富氏变换或拉氏变换的方法<sup>[20, 21, 25]</sup>, 基于正交多项式的方法<sup>[22]</sup>, 基于抽样定理的方法<sup>[23]</sup>, 基于快速富氏变换的方法<sup>[24]</sup>, 等等, 名目繁多, 显然这个工作的迫切性是存在的。为了提供计算所需数据, 必须在实验上加以解决, 所采用的方法有:

1) 用漫射照明得到广角全息图。TRW 的 Wuerker 和 Heflinger 设计过两种广角全息照相机<sup>[8]</sup>, 分别用于风洞和弹道测量, 其特点是用半圆漫射器和半圆形的记录介质, 一次就得到视角为 180° 的广角全息图, 能提供三维计算的全部数据。但也有人认为这办法得到全息干涉图质量太差<sup>[18]</sup>, 不适于定量分析。

2) 使模型绕风洞轴线转动, 得到 4—5 张不同方位的全息图, 提供三维计算的全部数据<sup>[25, 26]</sup>。

3) 用多方向全息干涉图法<sup>[22, 27]</sup>。例如多路物光和一路参考光把流场记录在一张全息图上<sup>[28]</sup>, 再现时可得到足够的的数据。也可用三张全息图同时记录足够 180° 视角的流场全息图<sup>[27]</sup>。

这一领域虽已有不少文献, 但看来尚未完满解决, 更谈不上方法的定型化。

### 3. 电子全息技术

70 年代初, Butters 和 Leendertz 等将电视滤波技术同全息照相及散斑效应结合起来, 研制成功电子散斑干涉仪 (ESPI)<sup>[28]</sup>, 最初用于无损检验, 后来扩展到干涉测量包括流场显示在内的多个领域。由于不必使用全息干板, 1/25 秒就可以得到结果, 受到很大的欢迎。电视摄像管的分辨率不高 (例如某型号摄像管的分辨率为 600×600 线, 面积 12.8×17.1 毫米<sup>2</sup>, 折合每毫米可分辨 38 个单元), 所以它要求特殊的全息记录形式。现行的方法是参考光和物光近于同轴, 物光又成像于摄像管上形成近同轴的像全息, 因此就可以大大降低记录全息图时分辨率的要求, 使电视摄像管也能记录。这一方法还便于与电子计算机联用, 由于信号可直接输入, 就可节省自动化数据处理的某些中间设备。

### 4. 数据处理的自动化问题

流场密度分布计算要化费大量劳动, 所以数据自动化处理技术是一个不容置疑的方向。一般方法是: 用光电扫描仪从全息图中读出流场信息, 通过软件输入计算机进行处理。这种扫描仪有时称为扫描数字显微密度计。例如, 据报道<sup>[18]</sup>: 密度计能把密度分成 256 个等级, 用专用的析象管把画面分成 1000×1000 个点阵进行记录, 一张 4×5 吋<sup>2</sup> 的底板仅需 1—2 分钟就可扫描完毕记录于磁带上, 再输入计算机就可得到密度分布的结果。

### 5. 关于粒子流动场的显示测量

风洞中模拟粒子云的气动实验, 不但要对流场进行研究, 而且还要测量流场中粒子的分布情况。爆炸、等离子体、发动机燃烧室内的燃烧、引擎排气、大气变化、化学过程等问题的研究中, 都有观测粒子场的需要。因此粒子测量已经在原子核反应、化学工程、火箭工程发动机工程、天文学、环境污染等众多领域中发挥了作用, 测量粒子场的全息方法一般采用同轴全息照相方案, 由于其三维特性, 使得这一技术大大优于其他经典方法。早在 1965 年, 就有人用它来观测粒子<sup>[29]</sup>, 直到今天, 还不断有所发展, 例如 Royer<sup>[30]</sup>用双曝光全息术测量高速粒子的分布和速度。此技术的分辨率已在 10 微米以上, 数据处理工作繁重, 大多采用了自动化装置。

### 6. 其他流场显示问题

1) 燃烧、火焰和离子体的研究: 这是一些自身发光的研究对象, 过去的光学方法对之颇感困难。由于全息照相采用了高强度的相干光源——激光, 加上适当的滤光片就容易克服这一困难, 自身发射的光仅使全息片增加若干灰雾, 不会影响测量结果, 因而目前已达到可定量测量的水平。表征等离子体电离程度的电子数密度也可由全息方法测得。

2) 弹道学测量中炮口烟雾的影响: Lohmann 等通过对对流雾的研究指出<sup>[31]</sup>, 由于雾粒子的运动使碰到它的光线产生多普勒频移, 因而它和没有频移的参考光不能相干, 其结果则是雾并没有使全息记录的物体模糊。所以, 可以预期, 炮口烟雾可能对记录全息图并无影响, 这就使常规光学方法的不可能问题成为可能。

3) 旋转机械中的流场: 例如燃气轮机、涡轮叶片间的流动, 用全息技术可获成功的显示。古典光学方法则比较困难。

4) 在水动力学方面的应用: 水一般认为是不可

压缩流体,一般光学方法不能应用。但近年来有少量这方面的文献,例如Witte在分层静止的盐溶液中研究了潜艇模型开过后的尾流<sup>[8]</sup>,Achia在液体流动显示研究中发展了一个实时全息-莫尔干涉仪<sup>[9]</sup>,方法是在上游开设一条0.4毫米宽的缝,向流场注入1.5%丙烯乙醇溶液,可以用干涉方式观察到湍流现象的连续过程。据说现在有人找到一种能产生双折射效应的流体,也可以用全息方法进行流场显示(美籍华人毕海在北京的学术报告)。

## 7. 高速全息照相问题

把流场用高速摄影方式记录下来,用以研究流场随时间变化的情况,是研究非定常流必不可少的手段,是研究高速过程的有效方法。每两年召开一次的国际高速摄影会议,对流场显示很重视,每次会议文集中(本文简称为H. S. P.)都有不少这一领域的文章。

高速全息电影照相的工作可分为两类,一类是通过全息图用高速照相机实时拍摄,一类是纯全息法。前者一般帧速较低,原因是全息照相再现效率低,损失很多光能。但这种方法给出的是干涉图,和普通的高速照相有本质的区别。Raterink等用50毫瓦氩氦激光作光源,用漂白全息图的办法增加再现效率,得到2000张/秒的火焰干涉照片,得到的资料可作定量分析<sup>[33]</sup>。苏联A. S. Dukovik用红宝石激光作光源作实时法拍摄,总记录时间可达0.6毫秒,高速照相速度为 $36 \times 10^4$ 张/秒,时间分辨率达 $3 \times 10^{-6}$ 秒,在对激光供能系统作了改进以后,总记录时间达到几个毫秒<sup>[34]</sup>。纯全息法的基础是高重复频率窄脉冲激光技术的发展,一般帧速决定于激光的重复频率。例如Lowe用旋转参考光的办法记录全息图<sup>[35]</sup>,红宝石激光脉冲与转镜同步,一次可记录10张全息图(在一张干板上),参考光间隔 $9^\circ$ ,光脉冲频率50—200千赫。Gate等发展了一种重复Q开关脉冲组红宝石激光,频率20千赫,每次可得到15张时间序列全息图,是由物光在全息干板上作圆周扫描得到的<sup>[36]</sup>。此外,使全息干板高速旋转(2000转/秒)<sup>[37]</sup>,利用声光偏转技术使光束旋转(帧速达 $8 \times 10^4$ 张/秒)<sup>[38]</sup>等方法,也可用以记录时间系列全息图。纯全息法还可以得到极高帧速,Novaro用空间延时线方法将单脉冲激光分出多个光脉冲,一次可在一张干板上得到10个全息图,系统中没有运动部件,而帧速达3—4亿张/秒<sup>[39]</sup>。

应该注意锁模激光器的发展,它能发出超高频的微微秒脉冲( $10^{-12}$ 秒)系列,已经在生物、化学等一系列领域中起了神奇的作用。可以预期,在流场显示

中也会有重要的应用和发展。至少它给超高速全息记录提供了基础,例如Chabannes等利用它发展了一个帧速3亿张/秒的照相系统<sup>[40]</sup>。这是个值得注意的领域,或许会把流场显示技术推向更高的阶段。

高速全息照相是个极其重要的领域,目前发展尚不成熟,文献所见多是实验性和原理性的装置,尚有大量技术问题待解决和发展。

## 四、提高测量灵敏度的方法

光学方法测量流场,是以Gladstone-Dale关系所指出的物理依据为基础的。这个关系可以写成下列无量纲形式:

$$\Delta n = K \Delta \rho / \rho_0 \quad (1)$$

式中 $\Delta n$ 是和气体密度相对应的折射率差, $\Delta \rho$ 则是密度差, $\rho_0$ 是该气体在标准状态下的密度, $K$ 是无量纲常数,对空气和可见光束来说, $K \approx 2.94 \times 10^{-6}$ 。由于 $K$ 值较小,所以给光学方法测量流场带来灵敏度不够的困难。用有限条纹干涉法研究流场时,其分辨率一般认为只有 $1/20$ 波长左右,而实际流场显示课题中则存在大量远小于 $1/20$ 波长的物态。例如高超声速气流流场研究,花样繁多的低速流场研究,小截面管道流研究等等。因此,提高干涉技术的灵敏度,一直是有重要意义并且有迫切需要的研究课题。

就本文作者所知的极为贫乏的资料,现在简介全息技术中提高灵敏度的一些技术,希望达到抛砖引玉的目的。

1. 光线多次通过实验段技术 众所周知,通过光学元件的帮助,很容易实现光线两次穿行实验段,从而达到使灵敏度增加1倍的目的。Brooks提出多次通过全息干涉仪,在1970年取得了美国专利<sup>[41]</sup>。他的方法是使光线多次穿行实验段,想办法让最后一次穿出来的物光与参考光构成全息图,如果光线往返各 $N$ 次时,就可达到位相放大 $2N$ 倍的目的。(还可参看文献<sup>[42]</sup>,<sup>[43]</sup>)。这个方法的缺点是光穿行的次数越多,最后穿出来的光越弱,这限制了灵敏度的提高。<sup>[43]</sup>中报道了 $N=7$ 时,位相放大14倍的结果。<sup>[41]</sup>报道的两个方法是:(a)使光束微微倾斜地入射实验段,光束反射回来时就有一位移,通过放在透镜焦平面上的光阑把前几次返回的光束挡住,只容许第 $N$ 次反射回来的光束到达全息干板。(b)利用相干长度较短的激光作光源,控制光脉冲的脉宽和参考光的光程,使参考光只和第 $N$ 次返回的脉冲相干构成全息图,于是前几次的光脉冲虽然也到达了干板,但它们没有和参考光相干涉,只形成全息图的灰雾,再现时并不出现它们携带的信息。

2. 全息移相技术 Velzel提出在全息照相两

次曝光间,对参考光移相可增加灵敏度,并公布了移相 $\pi/2$ 时的高灵敏度照片<sup>[44]</sup>。Smeets在差分干涉仪上控制相干涉的两束光的相位差,使其在 $\pi/2$ 附近,实现了约1/500波长的分辨率<sup>[45, 46]</sup>,实际上也是利用了移相技术。这些方法都是以无限条纹状态为基础的。力学所李华煜、徐朝仪等对全息移相干涉进行了分析和原理性试验<sup>[47]</sup>,指出:(1)最佳移相值受亮度增益的记录技术影响,实际上在 $\pi$ 附近,而不是上述文献所用的 $\pi/2$ 。(2)移相值为 $\pi/2$ 时,亮度增益最大,流场干涉图的亮度与相位成线性关系,因而有较大实用价值。并且其分辨率为1/1000波长左右,较不移相时灵敏度提高25.4倍。(3)移相值大于 $\pi/2$ 时,灵敏度继续增加,但此时亮度增益下降。记录弱相位就发生困难,限制了更大移相值的采用,其原理可由下面三个式子略见一斑:

$$I(x,y) = \frac{I_0}{2} \left[ (1 + \cos C) + \psi(x,y) \sin C - \frac{\psi^2(x,y)}{2} \cos C \right] \quad (2)$$

$$\Delta I(x,y) = I(x,y) - I|_{\psi(x,y)=0} = \frac{I_0}{2} \left[ \psi(x,y) \sin C - \frac{\psi^2(x,y)}{2} \cos C \right] \quad (3)$$

$$M = \frac{\Delta I(x,y)}{I|_{\psi(x,y)=0}} = \frac{\psi(x,y) \sin C - (\psi^2(x,y) \cos C)/2}{1 + \cos C} \quad (4)$$

式中 $I(x,y)$ 为双光束干涉时的亮度分布; $\psi(x,y)$ 为流场相位分布; $\psi \ll 1$ ;  $I_0$ 为不移相时背景亮度; $C$ 为移相值; $\Delta I(x,y)$ 为亮度增益; $M$ 为与背景亮度相比较的对比度; $I|_{\psi(x,y)=0}$ 为背景亮度。由于 $\psi^2(x,y)$ 非常微小,由式(4)易于看出, $C=0$ 时对比度最差, $C=\pi$ 时对比度最好。但由式(3)可以看出,亮度增益在 $C=\pi/2$ 时最大,在 $C=0$ 或 $\pi$ 时最小。所以上面得到的结论是易于了解的。

**3. 条纹倍增技术** Bryngdahl和Lohmann在1968年提出象全息照相概念,并指出利用象全息图的非线性,可以实现位相放大(即条纹倍增)<sup>[48]</sup>。线性全息图再现时,只能出现一级衍射波,但如果处理全息图时引入非线性(例如过度曝光或过度显影),再现时就会出现高阶衍射波,这种高阶衍射波就会使位相倍增。例如流场物光波(即一级衍射)为

$$A e^{i[2\pi\nu x + \psi(x,y)]}$$

时,第 $m$ 阶衍射光波就是

$A e^{i[2\pi m\nu x + m\psi(x,y)]}$ 。利用在Fraunhofer平面上的滤波器,引导两个不同的衍射波相干涉,得到的就是条纹倍增的干涉图。例如使第 $m$ 阶衍射光波与第 $(-m)$ 阶衍射光波相干涉,就得到 $2m$ 倍的相位放大。文献[49,50]报道的原理性实验,可使灵敏度增大至14倍。力学所全息组做过简单的非线性衍射试验,发现获得清晰的第5阶衍射像是不困难的。苏联Belozercov等人把这技术应用到低雷诺数( $Re=3.5 \times 10^3$ )的风洞中,获得灵敏度增大4倍的效果<sup>[51]</sup>。这个方法的缺点是把光学元件引入的误差一起放大,使应用受到限制。文献[51]认为,4倍以上的灵敏度增加是不可取的,因为误差也已被放大到不可用的程度。Toyooka为此发展了一种方法,可消除光学元件误差,但又实现了8倍的位相放大。他的方法要用两张全息干板,较麻烦<sup>[52]</sup>。Bryngdahl提出纵向反演剪切干涉方法,使全息图的再现物光(用原参考光照射单曝光全息图得到)和纵向反演再现物光(用与原参考光对称的光束照射全息图得到)互相干涉,得到纵向反演剪切干涉图,这时位相被放大成2倍,也属于条纹倍增的方法之一<sup>[53]</sup>。他还提出一个重复照相的方法,把位相一次次地加倍,文中给出位相增加到8倍时的照片。文献[54,55]提到的多波长光源干涉,造成条纹内插,也是条纹倍增技术,在一定条件下可转用于流场显示。据[54,55]报道,其灵敏度可达1/300—1/1000波长。

**4. 空间滤波技术** 单曝光的流场全息照片,再现时可用各种空间滤波技术处理。方法就是在焦平面内加各种空间滤波器,例如相衬方法<sup>[56]</sup>,可使灵敏度高达1/2000波长以上。退相方法<sup>[57]</sup>,涅拉斯顿棱镜移相干涉方法<sup>[45]</sup>等等,都是可用的高灵敏度空间滤波方法。最近,Lohmann等来我国讲学时指出,应用计算机全息图做空间滤波器是简单而有效的,例如纹影刀口和相衬板是最简单的例子,可先用手绘出全息图,再经精缩摄影即成。这是应该充分注意的方向之一。计算机全息图制成的空间滤波器,可直接用在仪器上,可避免单曝光全息图基引入的误差。

**5. 光电相位计技术** 这一技术在干涉问题上早就被应用了。R.Crane在1969年就报道过这一技术,指出其灵敏度相当于1/300波长<sup>[58]</sup>。这个方法当然可以用到全息照相上去,例如文献[17]报道了一个双参考光系统,其原理如下:第一次曝光时将参考光 $R_2$ 挡住, $R_1$ 和物光 $O_0$ 作用于全息干板上(图1),第二次曝光时将参考光 $R_1$ 挡住, $R_2$ 和物光 $O_m$ 作用于全息干板上。再现时用 $R_1$ 和 $R_2$ 同时照射全息图,就可得到和两次曝光全息图相仿的干涉图。使用电子相位计时要将一个棱镜移相器放在参考光 $R_2$ 的光路中,

当棱镜之一等速移动时,放在全息照相再现图形象平面上的二探测器就会输出同频正弦变化光强信号,输入电子相位计中去后,就可给出二探测点的相位差。由于频率漂移以相同的方式作用到二探测器上去,因此频率漂移不会影响测量结果(测量频率由棱镜运动的速度所决定,棱镜移动半个波长距离所需时间的倒数就是该频率)。此外,二探测点处的光强与所测的相位差无关,所以特别适用于光场不均匀时的相位差测量。如果测相的精度可达 $1^\circ$ 时,相应的灵敏度就达到 $1/360$ 波长。文献[59]利用对参考光进行频率调制,使探测器输出正弦信号,然后用电子相位计测出两探测点间的相位差。照相方法和[17]相同(参见图1),再现时使参考光 $R_1$ 的频率调制成 $\omega_1$ ,参考光 $R_2$ 的频率调制为 $\omega_2$ 。 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 和原来照相时的频率 $\omega_0$ 相近,并有 $(\omega_1 + \omega_2)/2 \approx \omega_0$ ,  $|\omega_1 - \omega_2| \ll \omega_0$ ,其中拍频 $\Omega = \omega_1 - \omega_2$ 是低频,低到光学接收器可以分辨。这样,两个探测器的输出都是正弦信号,其频率为 $\Omega$ ,输入电子相位计即可测出两探测点间相位差。其原理简介如下。对像点 $p$ 处的光波,可用下式表示:

$$V(t, p) = V_0(t, p) + V_M(t, p) \quad (5)$$

式中 $V_0$ 是第一次曝光时物光 $O_0$ 的再现光波, $V_M$ 则是

$O_M$ 的再现光波。 $V_0, V_M$ 则可写成

$$\left. \begin{aligned} V_0(t, p) &= a_1(p)e^{i[\omega_1 t + \psi_1(p)]} \\ V_M(t, p) &= a_2(p)e^{i[\omega_2 t + \psi_2(p)]} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

在 $p$ 点的检测器得到的是 $V_0$ 和 $V_M$ 干涉的光强信号,

$$\begin{aligned} \text{即 } I(t, p) &= |V_0 + V_M|^2 \\ &= a_1^2(p) + a_2^2(p) + 2a_1(p)a_2(p) \\ &\quad \cdot \cos[\Omega t + \psi(p)] \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $\psi(p) = \psi_1(p) - \psi_2(p)$ 。因此,电子相位计就能把 $p$ 点和 $q$ 点的相位差 $\psi(p) - \psi(q)$ 测量出来。频率调制可以用很多方法,例如声光调制、光栅旋转等。文献[59]宣称获得相位的测量精度达 $0.2^\circ$ ,相当于 $6 \times 10^{-6}$ 波长。这一工作还可参阅[60]。

**6. 显微密度计技术和光电光强接收技术** 显微密度计使一个条纹以下的干涉图的定量测量成为可能。目前的技术是对整个全息图自动扫描,并把测得的数据输入计算机,从而得到整理好的流场密度分布数据[18]。由于密度计可以把密度分成256个等级[18],因此测量的灵敏度就达到了 $1/512$ 波长。在有限条纹法中,密度计能把条纹中心线位置精确测定,据说也能达到 $1/1000$ 波长的灵敏度[81]。在一般干涉方法中,记录胶片的粒度和光学元件的缺陷限制了

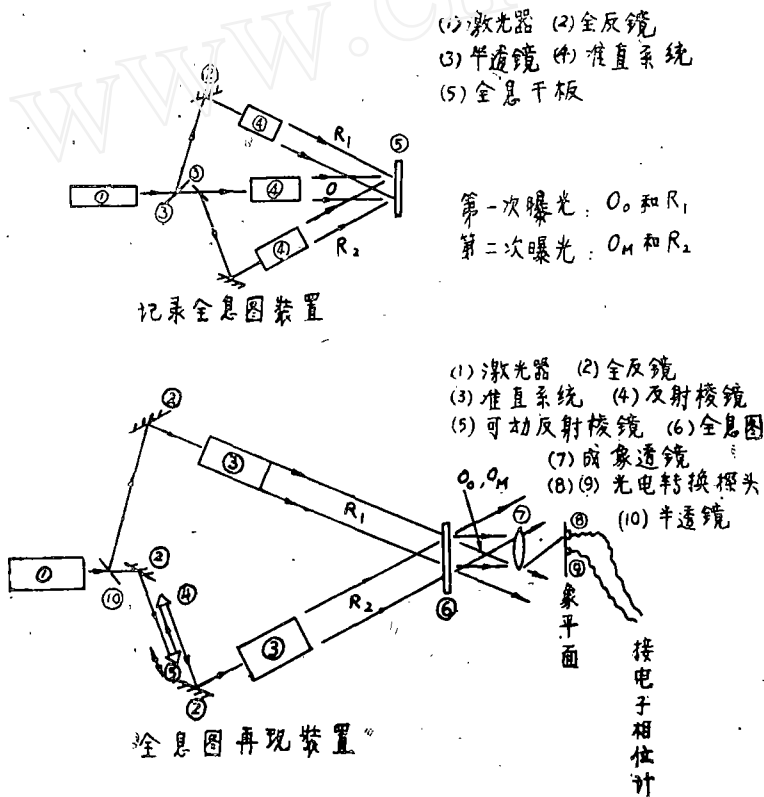


图1 双参考光全息技术装置示意图

测量灵敏度, 但如使用光电元件逐点记录, 在原理上分辨率可以极高, 只受到信号中光子发射噪声的限制。Smets用差分干涉仪和光电元件记录流场, 时间分辨率达到0.1微秒, 空间分辨率达1/100毫米, 灵敏度达到 $0.05\text{\AA}$  [62], 11届国际高速照相会议上, R. Schall在特邀报告 [63] 中曾对此给予相当高的评价。这种技术当然也可在全息技术中应用。

在这里还要附带提一下多光束干涉技术。这一技术能使干涉条纹变得非常细, 从而提高了灵敏度 [50, 61, 64, 65]。

综上所述, 如果上述的各项技术发展成熟, 灵敏度问题就在很大范围内解决了。

## 五、结 语

由于种种原因, 我们在流场全息显示上只做了很少的工作 [9, 16, 47, 66, 67]。从工作中我们感到这是一门重要、有发展前途的新技术, 特别是它具有传统技术不可能做到的一些特点, 更是引人注目。但是, 它还有很多具体技术困难有待解决, 例如风洞环境的振动会引入误差, 如何消除它的影响得到高质量的全息干涉图, 就是当前最迫切的问题之一。这些技术问题解决的成熟程度, 将决定全息方法的前途。

应该注意到全息照相方法的潜力可能还远未挖尽, 所以, 请让我们引用美国阿诺德工程发展中心的 J. D. Trolinger 教授的话作为本文的结束: “在传统技术失效的领域中, 应用全息照相的惊人的巨大机会, 正呈现在全息和空气动力学工作者们的面前。”

## 参考文献

- [1] Powell, R. J. (1965), *J. O. S. A.*, 55: 1593.
- [2] Burch, J. M. (1965), *Proc. Engr.*, 44: 431.
- [3] Heflinger, L. O., et al. (1966), *J. A. P.*, 37: 642—649.
- [4] Tanner, L. H. (1966), *J. Sci. Instrum.*, 43: 81—83.
- [5] Philbert, M., Surget, J. (1968), *Rech. Aerosp.*, 122: 55—60.
- [6] Smigielski, P., Royer, H. (1968), *L'onde Électrique*, 48: 223—225
- [7] Reinheimer, C. J., et al. (1970), *Appl. Opt.*, 8: 2326—2328.
- [8] Witte, A. B. (1972), *Proc. Eng. Appl. of Holog. Symp.*: 220.
- [9] 中国科学院力学研究所射流组 (1977), *力学*, 3: 222.
- [10] Trolinger, J. D. (1970), AEDC—TR—70—44.
- [11] Smigielski, P. (1970), *Proc. 9th High—Speed Photography* (简称为 H. S. P.): 321—326.
- [12] Havener, G., et al. (1972), *Opt. Electron*, 4: 4.
- [13] Wuerker, R. F. (1974), *Proc. ICO Conf. Opt. Methods in Sci. & Indu. Meas. (Tokyo)*.
- [14] Bramson, N. (1974), *Appl. Opt.*, 13, 9: 2019.
- [15] 明海等 (1979), *力学与实践*, 3: 57.
- [16] 李华煜等 (1979), *激光*, 6, 8: 33.
- [17] Ballard, G. S. (1971), *Holography & Optical Filtering. The Proc. of a Conf. Spon. by the National Aeronau. and Spa. Admini. and Opt. Soci. of Amer.*
- [18] Strike, W. T., et al., AD—A 007689.
- [19] Witte A. B., et al. (1967), *Final report—Laser holography, TRW System Report.* 或 (1970), *AIAA J.*, TN 8, 3: 581—583.
- [20] Rowley, P. D. (1969), *J. O. S. A.*, 59, 1: 1496.
- [21] Junginger, H. G., et al. (1972), *Opt. Commu.*, 5, 1: 1.
- [22] Maldonado, C., et al. (1966), *J. O. S. A.*, 56: 1305.
- [23] Sweeney, D., et al. (1972), *Proc. Eng. Appl. Holo. Symp.*
- [24] Jones, H. W. (1974), AD781396.
- [25] Zien, T. F., et al. (1974), *NOLTR* 74—96, AD—A009753. 或 (1975), *AIAA J.*, 13, 7: 841.
- [26] Jagota, R. C., et al. (1972), *J. A. M.*, 39: 893.
- [27] Matulka, et. al. (1971), *J. A. P.*, 42, 3: 1109.
- [28] Butters, J. N. (1977), *Opt. & Las. Tech.* 9, 3: 117.
- [29] Thompson, B. J., et al. (1965),

- J. O. S. A.*, 55: 1566.
- [30] Royer, H. (1974), 11th H. S. P.
- [31] Lohmann, A. W. (1974), Proc. ICO Conf. Opt. Methods in Sci & Indus. Meas., 201.
- [32] Achia, B. U. (1972), *Appl. Opt.*, 11, 4: 953.
- [33] Raterink, H. J., et al. (1970), 9th H. S. P.: 31.
- [34] Dubovik, A. S., et al. (1974), 11th H. S. P.
- [35] Lowe, M. A. (1970), 9th H. S. P.: 25.
- [36] Gate, J. W. C., et al. (1970), 9th H. S. P.: 4.
- [37] Smigielski, P., et al. (1970), 9th H. S. P.: 321.
- [38] Feldman, M., (1970), 9th H. S. P.: 16.
- [39] Novaro, M. (1972), 10th H. S. P.: 205.
- [40] Chabannes, F., et al. (1970), 9th H. S. P.: 69.
- [41] Brooks, R. E. (1976), U. S. P. 3528719 (Sep. 15) (Multipass holographic interferometer).
- [42] Langenbeck, P. H. (1969), *Appl. Opt.*, 8, 3: 543.
- [43] (1970) Application of Holography, Proc. of the Inter. Symp. of. Holo.
- [44] Velzel, C. H. F. (1970), Application De L'Holographic Proc. of the Inter. Symp. of Holo.
- [45] Smeets, G., et al. (1972), 10th H. S. P.: 244.
- [46] Smeets, G. (1974), 11th H. S. P.: 283.
- [47] 李华煜等 (1979), 力学学报, 2: 171.
- [48] Bryngdahl, O., Lohmann, W. (1968), *J.O.S.A.*, 58, 1: 141.
- [49] Matsumoto, K., et al. (1970), *J. O. S. A.*, 60: 30.
- [50] Sayangi, K., et al. (1969), *Appl. of Holog.*, Proc. of the U. S.-Jap. on Infor. Process. by Holo: 169.
- [51] Belozarov, A. F., et al. (1974), 11th H. S. P.: 301.
- [52] Toyooka, S. (1974), *Appl. Opt.*, 13, 9: 2014.
- [53] Bryngdahl, O. (1969), *J. O. S. A.*, 59, 2: 142.
- [54] Schulz, G., et al. (1971), *Appl. Opt.*, 10, 4: 929.
- [55] Pilston, R. G., et al. (1969), 8: 3: 553.
- [56] Zernike, F. Z. (1935), *Tech. Phys.*, 16: 454.
- [57] Royer, H. (1970), 9th H. S. P.: 410-413.
- [58] Crane, R. (1969), *Appl. Opt.*, 8, 3: 538.
- [59] Dändliker, R., et al. (1974), *Opt. Commu.*, 9, 4: 412.
- [60] Ineichen, B., et al. (1977), *Appl. of Holo. and Opt. Proc.*
- [61] 韩昌元 (1976), 光学机械, 4.
- [62] Smeets, G. (1971), 8th Inter. Shock tube Sympos.
- [63] Schall, R. (1974), 11th H. S. P.
- [64] Poster, H. D. (1969), *Appl. Opt.*, 8, 3: 522.
- [65] Matsumoto, K. (1969), *J. O. S. A.*, 59: 777.
- [66] 安徽光机所三室全息组、力学研究所全息组 (1978), 激光, 4: 13.
- [67] 中国科学院力学研究所、安徽光机所全息任务协作组 (1978), 力学情报, 1: 9.